

## Електричне поле в околі пошкодження протикорозійного покриття трубопроводу

© В. В. Лукович, 2011

Інститут проблем матеріалознавства НАН України,  
Київ, Україна

Надійшла 3 листопада 2010 р.

Представлено членом редколегії В. М. Шуманом

Построена математическая модель электрического поля на поверхности повреждения противокоррозионного покрытия трубопровода. Проиллюстрированы результаты расчетов по этой модели.

Mathematical model of electric field on the damage surface of the pipeline anticorrosive coating has been constructed. Calculations have been made according to this model. The results of calculations have been demonstrated on the diagrams.

За останні кілька років почастишали аварії на магістральних трубопроводах унаслідок корозійного розтріскування під напругою — стрес-корозії. Частіше вони трапляються на газопроводах. Однією з важливих причин стрес-корозії вважають збагачення трубної сталі воднем, який проникає на трубопровід через пошкодження протикорозійного покриття в процесі катодної поляризації. Якщо різниця потенціалів труба — земна поверхня велика, то за даними поляризаційної кривої густина струму в пошкодженнях сягає 30—50 А/м<sup>2</sup>. За даними [Хижняков, 2009], аварії внаслідок стрес-корозії зафіксовані на трубопроводах, захисна різниця потенціалів на яких становила –1,3; –3,5 В. У згаданій статті наведено результати вимірювання густини струму в околі пошкоджень при захисній різниці потенціалів понад –1,5 В, які практично збігаються з даними залежності між цими величинами за поляризаційною кривою.

У статті [Лукович, Лукович, 2010] проведені дослідження залежності густини струму в пошкодженнях від різниці потенціалів труба — земна поверхня й опору ґрунту. За результатами досліджень найнебезпечнішою є велика різниця потенціалів труба — земна поверхня в низько-омних ґрунтах й на трубопроводах, частка пошкоджень яких незначна.

У статті розглянуто математичну модель поля на поверхні окремого пошкодження покриття трубопроводу (за відсутності впливу поля інших пошкоджень). За цією моделлю розраховані зміни потенціалу й густини струму на поверхні самого пошкодження, взятої у формі квадрата, площа якого становить 81 см<sup>2</sup>, 81 мм<sup>2</sup>, 0,81 мм<sup>2</sup>, 0,01 мм<sup>2</sup>. Зрозуміло, що поле окремого пошкодження відрізнятиметься від реального поля, створюваного сукупністю багатьох пошкоджень, однак на самій поверхні воно значно переважатиме вплив поля навіть суміжних з ним пошкоджень.

Потенціал труби  $U_T$  у місці пошкодження практично є сталою величиною, тому що електропровідність її на декілька порядків більша за електропровідність Землі. Залежно від  $U_T$  потенціал в околі пошкодження змінюватиметься внаслідок поляризації на межі поверхня труби — прилеглий до неї ґрунт і поля Землі. Позначимо потенціал в околі пошкодження на межі з поверхнею ґрунту через  $U_p$ , а густину струму через  $J$ . За даними поляризаційної кривої [Швец, 1993], можна обчислити значення  $J$  за різницею  $U_T - U_p$ . Потенціал  $U$  в довільній точці Землі задовільняє рівняння

$$\int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} W_{ikl}(\theta) a d\theta, \quad i = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, n}; \quad l = \overline{1, n}$$

для всіх значень  $i, k$  та  $l \neq j$  виконаємо за допомогою чисельного методу трапецій. При  $k = i$  та  $l = j$  логарифм частки

$$2 \ln \frac{x_{ck} - x_k + \sqrt{(x_{ck} - x_k)^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\phi_{cl} - \theta}{2}}}{2a \sin \frac{|\phi_{cl} - \theta|}{2}}$$

запишемо у вигляді різниці логарифмів чисельника й знаменника:

$$2 \ln \left[ x_{ck} - x_k + \sqrt{(x_{ck} - x_k)^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\phi_{cl} - \theta}{2}} \right] - 2 \ln 2a \sin \frac{|\phi_{cl} - \theta|}{2}.$$

Логарифм знаменника дорівнює  $-\infty$  при  $\phi_{cl} = \theta_{cl}$ , тому інтегрування його виконаємо в квадратурах, а для інтегрування логарифма чисельника використаємо той же метод трапецій. У результаті отримаємо систему рівнянь відносно невідомих  $J_{kl}$  і  $R_{pkl}$ , яку розв'яжемо методом ітерацій.

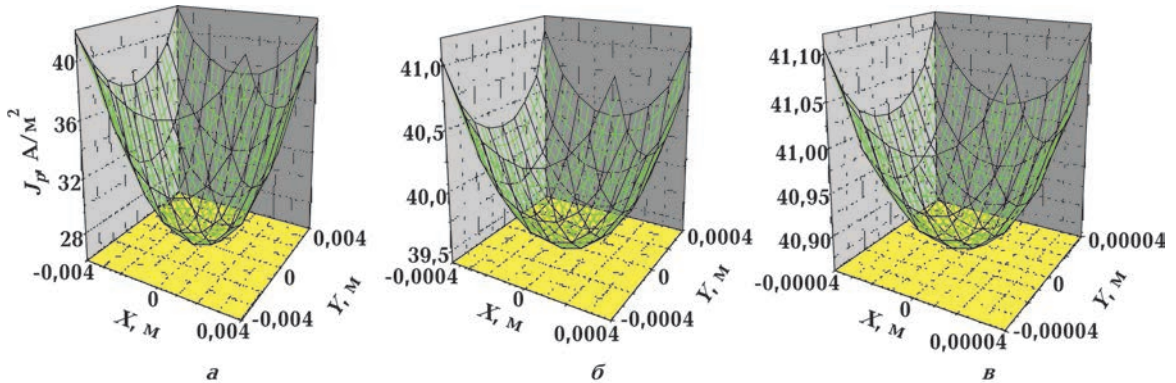


Рис. 1. Зміна густини струму на поверхні пошкодження площею: а —  $9 \times 9 \text{ мм}^2$ ; б —  $0,9 \times 0,9 \text{ мм}^2$ ; в —  $0,09 \times 0,09 \text{ мм}^2$ ,  $U_T = -2 \text{ В}$ .

Розроблено алгоритм і програму розв'язування системи рівнянь (5) та розраховано потенціал й густину струму в пошкодженні площею  $9 \times 9 \text{ см}^2$ ;  $9 \times 9 \text{ мм}^2$ ;  $0,9 \times 0,9 \text{ мм}^2$ ;  $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$  поверхні трубопроводу діаметра 1020 мм, розміщеного на глибині 2 м (від його осі до земної поверхні). Опір ґрунту взято  $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . За результатами досліджень [Хижняков, 2009; Лукович, Лукович, 2010], саме в ґрунтах з малим опором корозійні процеси інтенсивніші (рис. 1). Зауважимо, що на рис. 1 ордината  $J_p$  має свій масштаб (а: 25—41; б: 39,4—41,25; в: 40,85—41,2  $\text{А/м}^2$ ). Середнє значення густини струму в пошкодженнях таке,  $\text{А/м}^2$ : рис. 1, а — 33,7; рис. 1, б — 40,1; рис. 1, в — 40,99. Однак у кутах квадратів воно не менше за  $41 \text{ А/м}^2$  для всіх трьох варіантів.

На рис. 2 зображено зміну густини струму в пошкодженні площею  $9 \times 9 \text{ см}^2$ , коли  $U_T$  дорівнює 3 В.

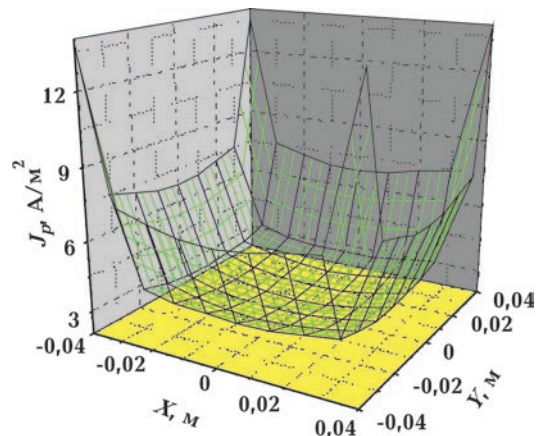


Рис. 2. Зміна густини струму на поверхні пошкодження площею  $9 \times 9 \text{ см}^2$ .

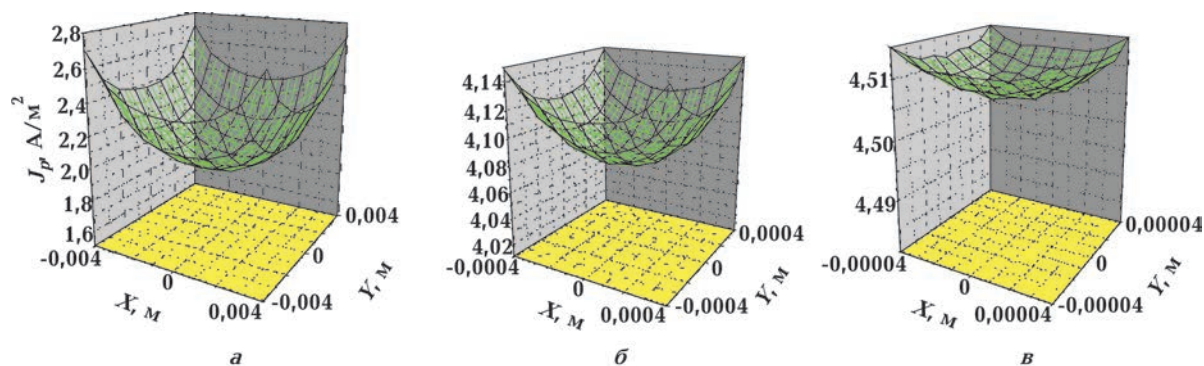


Рис. 3. Зміна густини струму на поверхні пошкодження площею: *a* —  $9 \times 9 \text{ мм}^2$ ; *б* —  $0,9 \times 0,9 \text{ мм}^2$ ; *в* —  $0,09 \times 0,09 \text{ мм}^2$ ;  $U_T = -1 \text{ В}$ .

На більшій частині площі всередині поверхні пошкодження густина струму не перевищує  $3 \text{ А/м}^2$ , тоді як у кутах квадрата вона дорівнює  $13 \text{ А/м}^2$ . Отже, більша частина струму проходить з ґрунту на поверхню труби по периметру пошкодження.

На сьогодні немає інформації про ту межу значення густини струму, вище якої накопичуються складові руйнування на поверхні трубопроводу. Однак густина струму, зображена на рис. 1, явно перевищує цю межу. Їй відповідають значення поляризаційної різниці потенціалів  $-1,6$  (для густини струму рис. 1, *a*),  $-1,83$  (для густини струму рис. 1, *б*),  $-1,88 \text{ В}$  (для густини струму рис. 1, *в*). Ці значення явно перевищують допустиму захисну різницю потенціалів [Хижняков, 2009], однак вони часто трапляються у звітах про проведення повного обстеження на магістральних трубопроводах.

Для порівняння на рис. 3 зображені графіки з тими самими параметрами, що й на рис. 1, але  $U_T$  дорівнює  $-1 \text{ В}$ . Густина струму змінюється від  $2$  до  $2,7 \text{ А/м}^2$  (рис. 3, *a*), від  $4$  до  $4,15$  (рис. 3, *б*), від  $4,5$  до  $4,515 \text{ А/м}^2$  (рис. 3, *в*) і, відповідно, поляризаційна різниця потенціалів  $F_p$  становить  $0,91$ ;  $0,98$ ;  $1 \text{ В}$ . В усіх цих варіантах  $F_p$  більша за величину мінімального захисного потенціалу.

Проведені також розрахунки залежності поляризаційних густини струму  $J_p$ , різниці потенціалів  $F_p$  та опору  $R_p$  від потенціалу трубопроводу  $U_T$  (відносно нескінченно віддаленої точки Землі, питомий опір якої  $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). На рис. 4 видно, що за площі пошкодження, меншій за  $1 \text{ мм}^2$ , пунктирні лінії практично злилися із суцільними, суцільні близькі між собою, хоча площа пошкодження на графіку 2 у  $100$  разів більша порівняно з графіком 3. На поверхні площею  $0,81 \text{ см}^2$  суцільна лінія 1 значно нижча від 2, а пунктирна віддаляється вгору від неї зі збільшенням величини  $-U_T$ . Отже, небезпечно збільшувати величину  $-U_T$  трубопроводу з малими пошкодженнями протикорозійного покриття, тому що із збільшенням  $-U_T$  дуже швидко збільшується  $J_p$ .

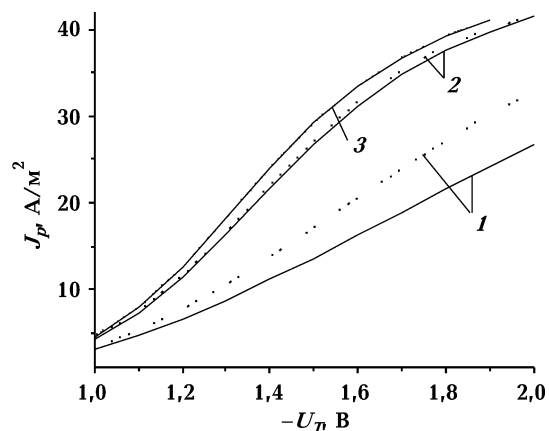


Рис. 4. Залежність максимальної (пунктирні лінії) і середньої (суцільні лінії) густини струму  $J_p$  на поверхні пошкодження площею  $0,81 \text{ см}^2$  (1),  $0,81 \text{ мм}^2$  (2) і  $0,01 \text{ мм}^2$  (3) від  $U_T$ .

На рис. 5 (лінії 2, 3) видно, що поляризаційна різниця потенціалів  $F_p$  для невеликих пошкоджень практично дорівнює  $U_T$ . Зате  $F_p$  на поверхні пошкодження, площа якої не менша за  $0,81 \text{ см}^2$ , значно відстає від  $U_T$ . У нормативній документації узаконено обмеження зверху захисної різниці потенціалів значенням  $-2,5 \text{ В}$ . Узаконено доведення густини струму на малій площі пошкоджень до  $30\text{—}50 \text{ А/м}^2$  з усіма негативними наслідками для експлуатаційних характеристик труби.

$$U = -\frac{\rho}{4\pi} \int_{x_1}^{x_{n+1}} \int_{\theta_1}^{\theta_{v+1}} J(\xi, \theta) \times \\ \times \sum_{l=0}^1 \left[ (x - \xi)^2 + (y - a \sin \theta)^2 + (z + h - (-1)^l a \cos \theta)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta, \quad (1)$$

де  $\rho$  — питомий опір Землі;  $x, y, z$  — координати довільної точки Землі, задані в системі  $Oxyz$  так, що площина  $xOy$  збігається із земною поверхнею, площина  $xOz$  проходить через вісь труби, яка знаходиться на глибині  $h$ . В площині  $yOz$  розмістимо довільну точку відрізка  $[x_1, x_{n+1}]$ , наприклад  $x_1$ . Геометрія поверхні пошкодження може бути довільною. В цьому випадку формула (1) буде значно громіздкішою. У виразі (1) поверхня пошкодження задана у формі прямокутника, обмеженого відрізками  $[x_1, x_{n+1}]$  і  $[a\theta_1, a\theta_{n+1}]$ .

На поверхні пошкодження з виразу (1) отримаємо

$$U_p = -\frac{\rho}{4\pi} \int_{x_1}^{x_{n+1}} \int_{\theta_1}^{\theta_{m+1}} J(\xi, \theta) \left\{ \left[ (x - \xi)^2 + 2a^2 (1 - \cos(\phi - \theta)) \right]^{-\frac{1}{2}} + \right. \\ \left. + \left[ (x - \xi)^2 + a^2 (\sin \phi - \sin \theta)^2 + (2h + a(\cos \theta - \cos \phi))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi a d\theta. \quad (2)$$

Рівняння, яке пов'язує  $U_p$  і  $J$  на межі поверхня труби — прилеглий до неї ґрунт, має вигляд [Остапенко, 1988]

$$U_p - U_T + \phi_{ст} = R_p J, \quad (3)$$

де  $\phi_{ст}$  — стаціонарний потенціал металу;  $R_p$  — поляризаційний опір.

Позначимо через  $F_p$  різницю  $U_T - U_p$  ( $F_p = U_T - U_p$ ). Підставивши замість  $U_p$  його значення з виразу (3), отримаємо рівняння для знаходження  $J$ :

$$R_p J + \frac{\rho}{4\pi} \int_{x_1}^{x_{n+1}} \int_{\theta_1}^{\theta_{m+1}} J(\xi, \theta) \left\{ \left[ (x - \xi)^2 + 2a^2 (1 - \cos(\phi - \theta)) \right]^{-\frac{1}{2}} + \right. \\ \left. + \left[ (x - \xi)^2 + a^2 (\sin \phi - \sin \theta)^2 + (2h + a(\cos \theta - \cos \phi))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi a d\theta = -U_T + \phi_{ст}. \quad (4)$$

Розв'язок рівняння (4) побудуємо методом ітерацій. За нульову ітерацію візьмемо  $U_p = 0$ . Тоді з  $F_p = U_T$  за поляризаційною кривою шукатимемо  $J$ , а за виразом (3) —  $R_p$ . У наступних ітераціях за знайденим з рівняння (4) значенням  $J$  з формули (3) знаходимо нове значення  $R_p$ . Процес ітерацій закінчуємо, коли найменші значення  $R_p$  з попередньої й наступної ітерацій збігатимуться із заданою точністю.

Перейдемо від неперервного рівняння (4) до його дискретного аналога. Для цього поділимо відрізок  $[x_1, x_{n+1}]$  на  $n$ , а  $[a\theta_1, a\theta_{m+1}]$  на  $m$  частин. Позначимо  $x_{ci} = (x_i + x_{i+1}) / 2$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), а  $\theta_{cj} = (\theta_j + \theta_{j+1}) / 2$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Замінімо в (4) інтеграли в межах  $x_1, x_{n+1}$  і  $\theta_1, \theta_{m+1}$  на суми інтегралів відповідно в межах  $x_i, x_{i+1}$  і  $\theta_j, \theta_{j+1}$ . У кожному з інтегралів замінімо  $J(\xi, \theta)$  на  $J_{ij}$ . В результаті замість (4) отримаємо систему рівнянь

$$R_{pkl} J_{kl} + \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J_{ij} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \left\{ \left[ (x_{ck} - \xi)^2 + 2a^2 (1 - \cos(\phi_{cl} - \theta)) \right]^{-\frac{1}{2}} + \right. \\ \left. + \left[ (x_{ck} - \xi)^2 + a^2 (\sin \phi_{cl} - \sin \theta)^2 + (2h + a (\cos \theta - \cos \phi_{cl}))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} d\xi a d\theta = -U_T + \phi_{CT}, \\ k = \overline{1, n}; l = \overline{1, m}, \quad (5)$$

відносно невідомих  $J_{kl}$  і  $R_{pkl}$ .

Розглянемо окремо вирази в квадратних дужках цієї системи. Найменша довжина відрізка, обчислена за виразом у других квадратних дужках, не менша за  $2h - 2a$ . Оскільки значення площі  $(x_{i+1} - x_i) a (\theta_{j+1} - \theta_j) = s_{ij}$  значно менше, ніж  $2h - 2a$ , то подвійний інтеграл від цього виразу замінимо добутком його (виразу) на площу  $s_{ij}$ :

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \left[ (x_{ck} - \xi)^2 + a^2 (\sin \phi_{cl} - \sin \theta)^2 + (2h + a (\cos \theta - \cos \phi_{cl}))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta = \\ = \left[ (x_{ck} - x_{ci})^2 + a^2 (\sin \phi_{cl} - \sin \theta_{cj})^2 + (2h + a (\cos \theta_{cj} - \cos \phi_{cl}))^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \circ s_{ij}, \\ k = \overline{1, n}; l = \overline{1, m}, \quad (6)$$

Перейдемо до розгляду виразу в перших квадратних дужках системи рівнянь (5). Проінтегруємо його по  $\xi$ :

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \left[ (x_{ck} - \xi)^2 + 2a^2 (1 - \cos(\phi_{cl} - \theta)) \right]^{-\frac{1}{2}} d\xi a d\theta = \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} W_{ikl}(\theta) a d\theta, \\ k = \overline{1, n}; l = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де

$$W_{ikl}(\theta) = \left\{ \begin{array}{l} \ln \frac{|x_{ck} - x_{i+1}| + \sqrt{(x_{ck} - x_{i+1})^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\phi_{cl} - \theta}{2}}}{|x_{ck} - x_i| + \sqrt{(x_{ck} - x_i)^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\phi_{cl} - \theta}{2}}}, \quad k \neq i; \\ 2 \ln \frac{x_{ck} - x_k + \sqrt{(x_{ck} - x_k)^2 + 4a^2 \sin^2 \frac{\phi_{cl} - \theta}{2}}}{2a \sin \frac{|\phi_{cl} - \theta|}{2}}, \quad k = i. \end{array} \right.$$

Інтегрування виразу



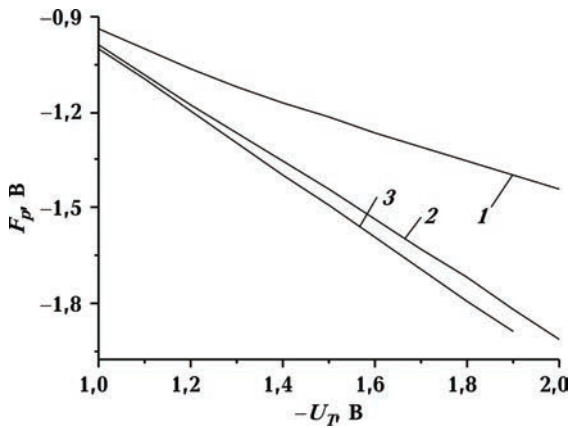


Рис. 5. Зміна поляризаційної різниці потенціалів  $F_p$  на поверхні пошкодження площею  $0,81 \text{ см}^2$  (1),  $0,81 \text{ мм}^2$  (2) і  $0,01 \text{ мм}^2$  (3) на відрізку  $U_T$   $[-1 \text{ В}, -2 \text{ В}]$ .

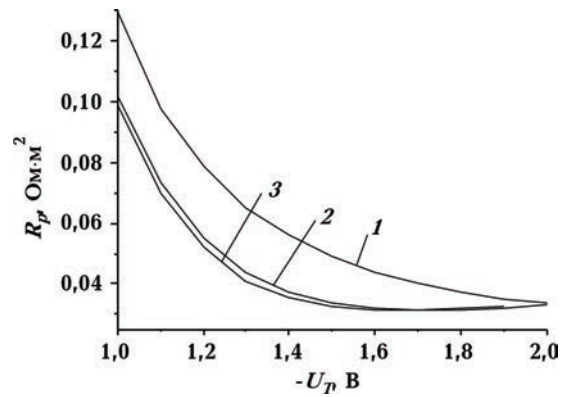


Рис. 6. Залежність поляризаційного опору  $R_p$  у пошкодженнях площею  $0,81 \text{ см}^2$  (1),  $0,81 \text{ мм}^2$  (2) і  $0,01 \text{ мм}^2$  (3) від  $U_T$ .

Пропонуємо верхню межу захисної різниці потенціалів знизити до  $-1,5 \text{ В}$ . Обґрунтуємо це за допомогою залежності поляризаційного опору  $R_p$  від  $-U_T$  (рис. 6). На відрізку  $[1,0 \text{ В}; 1,5 \text{ В}]$  він зменшується на всіх лініях. Однак при  $-U_T > 1,5 \text{ В}$  опір продовжує зменшуватись на лінії 1 (площа пошкодження  $0,81 \text{ см}^2$ ), тоді як на лініях 2 і 3 (площа пошкоджень  $0,81$  і  $0,01 \text{ мм}^2$ )  $R_p$  переходить практично у сталу величину. Якщо на відрізку  $[1,0 \text{ В}; 1,5 \text{ В}]$   $R_p$  має можливість зростати в процесі поляризації, то при  $-U_T > 1,5 \text{ В}$  залишається практично сталою величиною. Таке пояснення не претендує на повноцінне дослідження. Тому залишається побажати фахівцям, які практично займаються проблемами катодного захисту, доводити верхню межу різниці потенціалів труба — земля поверхня ближче до мінімального захисного потенціалу.

За побудованою математичною моделлю можна провести дослідження залежності параметрів захисту на поверхні пошкоджень від опору ґрунту та геометрії пошкоджень. З роботи [Лукович, Лукович, 2010] відомо, що найбільше проблем у системі катодного захисту виникає на ділянках трубопроводу, які знаходяться в низькоомних ґрунтах, коли захисна різниця потенціалів на них велика. Тому в статті основну увагу приділено саме цій проблемі.

### Список літератури

- Лукович В. В., Лукович В. В. Про поляризаційний потенціал магістрального трубопроводу // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 6. — С. 11—15.
- Остапенко В. Н., Ягупольская Л. Н., Лукович В. В. Кохановский И. Н., Егоров Е. В., Кузьменко Ю. Н., Калькутин Ю. Г. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. — Киев: Наук. думка, 1988. — 192 с.
- Хижняков В. И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциалов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Коррозия: материалы, защита. — 2009. — № 9. — С. 7—10.
- Швец В. А. Фізико-хімічні властивості протекторного сплаву АЦКМ та конструкційних сталей Х70, С<sub>Т</sub>3: Автореф. дис. ... канд. хім. наук. — Київ, 1993. — 21 с.